شبیه‌سازی و بهینه‌سازی حل عددی در تحلیل توزیع دما و تنشهای پسماند حرارتی در پوشش دولایه سد حرارتی $La_2Zr_2O_7/8YSZ$ به کمک حل المان محدود*

نسیم نایب پاشایی[۱] حسین وفایی نژاد[۲] سید حسین سیدین[۳] محمدرضا ابوطالبی[٤]
سید محمد مهدی هادوی[٥] حسین سرپولکی[٦]

چکیده

توزیع دما و تنش‌های پسماند در پوشش سدحرارتی سه لایه ($La_2Zr_2O_7/8YSZ/NiCrAlY$) تحت یک چرخه حرارتی ترکیبی و واقعی به کمک نرم افزار تجاری اباکوس شبیه‌سازی شد. از تکنیک کاهش زمان حل به روش مقیاس‌دهی جرمی برای جلوگیری از اعوجاج بیش از حد مش‌بندی، کاهش خطای عددی و واگرایی استفاده گردید. نتایج نشان داد که استفاده از روش افزایش جرم المان‌ها و جابجایی گره‌ها بصورت تطبیق‌پذیر باعث افزایش سرعت حل می‌شود که دلیل آن بزرگتر شدن نموهای حلی در فرایند است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تنش‌های پسماند در منطقه پوشش محافظ و نه زیرلایه تمرکز یافته است و این به نوبه خود باعث بهبود و افزایش عمر این محصول محافظ می‌باشد. تحلیل عددی نشان داد که بیشترین میزان اعوجاج بصورت عمده در ناحیه پوششهای سرامیکی متمرکز شده است.

واژه‌های کلیدی پوشش سد حرارتی، تنش پسماند، شبیه سازی المان محدود، شوک حرارتی

Finite Element Simulation of Temperature Distribution and Residual Stresses in New Thermal Barrier Coating $La_2Zr_2O_7/8YSZ$

نام نویسندگان به انگلیسی ارسال گردد

چکیده انگلیسی؟؟

Key words Thermal barrier coating, Residual stresses, Finite element simulation, Thermal shock

---

*نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ   و نسخه ی پایانی آن در تاریخ   به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسئول: دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران
(۲) دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران
(۳) دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران
(٤) استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران
(٥) دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه مالک اشتر
(٦) استاد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

DOI:

مقدمه

سوپرآلیاژهای مورد استفاده در اجزای توربین‌های دما بالا، به دلایلی همچون اکسیداسیون و گازهای خورنده که در شرایط کاری و در نتیجه احتراق آزاد می‌شوند، در معرض شرایط کاری دشوار قرار دارند [۱-٤]. ترکیب شیمیایی این سوپر آلیاژها به گونه‌ای است که می‌توانند استحکام خوب و مقاومت خزش در دمای بالا را تامین کنند اما به تنهایی حفاظت محیطی کافی ندارند، بنابراین اعمال پوشش محافظ برای حفاظت مواد زیرلایه از تخریب در شرایط کاری سخت ضروری است [٥،٦]. تلاش‌های متعددی در دهه‌های گذشته منجر به توسعه پوشش‌های حفاظتی برای اجزای توربین شده است [٥،٧].

پوشش‌های سد حرارتی وظیفه کاهش دمای اجزای موجود در بخش‌های داغ توربین‌های گازی و در نتیجه افزایش طول عمر آن‌ها را بر عهده دارند [٨،٩]. کاربرد این پوشش‌ها باعث کاهش شدت انتقال حرارت و کاسته شدن از دمای زیرلایه می‌شود که بهبود مصرف سوخت، افزایش قدرت موتور و ماندگاری اجزای موتور را در پی خواهد داشت. تحقیقات نشان داده است که این پوشش‌ها می‌توانند مقاومت خوبی در برابر سایش و خوردگی ایجاد کنند [١،٧،١٠].

عمر مفید پوشش‌های سد حرارتی عمدتاً تحت تاثیر ترکیب شیمیایی لایه واسط، نوع اکسید محافظ، دما و تغییرات آن، روش اعمال پوشش، عوامل محیطی مانند ترکیب شیمیایی و سرعت گاز، نمک مذاب خورنده و فرسایش ناشی از گازهای داغ است [۱-٤]. وظیفه اصلی پوشش‌های سد حرارتی جلوگیری از انتقال جریان گرمایی به زیرلایه است. بنابراین، قابلیت عایق سازی حرارتی به عنوان یکی از مهمترین فاکتورها در ارزیابی عملکرد و توسعه کاربردی این پوشش‌ها به شمار می‌رود [١١،١٢].

پوشش‌های سد حرارتی زیرکونیای به طور جزئی پایدار شده با ایتریا (YSZ) و پوشش میانی MCrAlY (Co =M و Ni ویا ترکیبی از این دو عنصر)، به دلیل دارا بودن طیفی از خواص موردنیاز، بیشترین کاربرد را به عنوان پوشش‌های محافظ در دمای بالا دارند [٨،١١،١٣]. در کنار مزایای فراوان این دسته از پوشش-های محافظ، نقطه ضعف اصلی YSZ دمای عملیاتی محدود (١٢٠٠°C) برای کاربردهای طولانی مدت است [١٤،١٥]. در دماهای بالاتر، استحاله فازی فاز شبه پایدار تتراگونال (t′) به فاز تتراگونال و فاز مکعبی باعث می-شود که حین سرمایش فاز تتراگونال به فاز منوکلینیک تبدیل شود و میکروترک‌ها در پوشش تشکیل شوند. علاوه بر این، با توجه به زینتر شدن پوشش در دماهای بالا، تخلخل پوشش کاهش می یابد در حالی که مدول یانگ و تنش کششی افزایش می‌یابد. این امر منجر به کاهش عمر مفید پوشش تحت چرخه‌های حرارتی می-شود. از سوی دیگر، این پوشش‌ها دارای غلظت بالایی از جای خالی یون اکسیژن هستند، که در دماهای بالا از طریق تشکیل پوستهٔ اکسیدی محافظ پایدار (TGO-اکسیدی که در اثر حرارت رشد می کند) در سطح لایه واسط به انتقال اکسیژن و اکسیداسیون لایه واسط در فصل مشترک سرامیک/لایه واسط کمک می‌کنند. این امر منجر به جدایش و شکست TBCها خواهد شد [١٤،١٥].

در پژوهش‌های انجام شده طی سالهای اخیر، روش های مختلفی برای غلبه بر مشکلات YSZ بررسی شده است [١٤]. گزارش شده که پوشش‌های سد حرارتی بر پایه زیرکونات، به علت هدایت حرارتی پایین‌تر و پایداری فازی بالاتر و مقاومت بیشتر در برابر زینترینگ در دمای بالا گزینه مناسبی برای کاربردهای آینده در موتور هواپیماها، توربین‌ها و دیگر قطعات دمای بالا باشند. $La_2Zr_2O_7$ (LZ) اخیراً به عنوان ماده مورد استفاده در پوشش‌های سد حرارتی، پیشنهاد گردیده است [١٥،١٦].

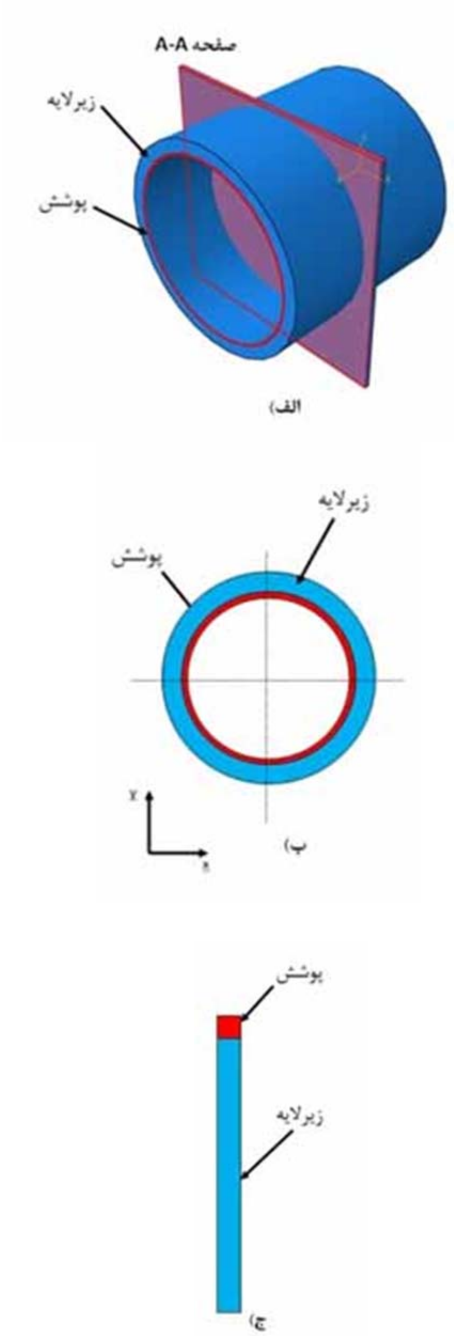
با توسعه صنایع جدید، تقاضا برای پوشش‌های سد حرارتی با عملکرد عالی به یک ضرورت تبدیل شده است. در این زمینه، ارزیابی و پیش‌بینی طول عمر پوشش‌های سد حرارتی اهمیت بیشتری یافته است. عموماً طول عمر و دوام پوشش‌های TBC، با تنش پسماند تعیین می‌شود. با توجه به آن که پوشش‌های سد حرارتی از چند لایه، شامل لایه فلزی و لایه سرامیکی، تشکیل شده‌اند تنش پسماند ناشی از عدم تطابق بین ضرایب انبساط حرارتی فلز و لایه سرامیکی، هنگامی که پوشش تحت چرخه حرارتی مابین گاز داغ و هوای خنک‌کننده قرار می‌گیرد، اجتناب ناپذیر خواهد بود [۱،۱۷،۱۸]. تنش پسماند منجر به جوانه‌زنی، رشد و گسترش ترک می‌شود [۸،۱۳،۱۹] و می‌تواند بر مدل شکست پوشش سد حرارتی تاثیر بگذارد. از اینرو، ارزیابی و پیش‌بینی الگوی توسعه تنش در پوشش سد حرارتی هنگام قرار گرفتن در معرض شوک حرارتی مهم و ضروری است [۱،۱۷].

روش‌های شبیه‌سازی عددی به ویژه روش‌های المان محدود، در ارزیابی رفتار پوشش‌ها و لایه فصل مشترک تحت بارگذاری‌های حرارتی و مکانیکی از طریق محاسبه میدان‌های تنشی و کرنشی کاربرد فراوانی دارد و به منظور درک توزیع تنش درفصل مشترک فلز–سرامیک، مکانیزم گسترش تنش پسماند در لایه‌های مختلف و همچنین الگوی توسعه ترک و فرآیند شکست TBC کاربرد فراوانی دارد [۱،۱۷،۱۹،۲۵].

با توجه به مطالب ذکر شده، یافتن یک ترکیب جدید جهت جایگزینی با YSZ به منظور بهبود خواص و دوام پوشش‌های سد حرارتی ضروری به نظر می‌رسد. لذا پوشش‌هایی بر پایه $La_2Zr_2O_7$ (LZ) به عنوان کاندیدای جدید جهت ارتقای سطح کارایی این پوشش‌ها در کانون توجه پژوهشگران قرار گرفته اند. لیکن تاکنون پژوهش جامعی در ارتباط با پیش بینی رفتار حرارتی و توزیع تنش‌های پسماند در پوشش‌های سد حرارتی بر پایه زیرکونات انجام نشده است. از اینرو، در این تحقیق شبیه‌سازی عددی توزیع دما و تنش‌های پسماند در پوشش سد حرارتی سه لایه ترکیبی ($La_2Zr_2O_7$/8YSZ/NiCrAlY) تحت یک چرخه حرارتی ترکیبی و واقعی، شامل گرمایش از دمای محیط تا دمای سرویس، نگهداری در دمای سرویس و سپس سرمایش تا دمای محیط مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش تحقیق

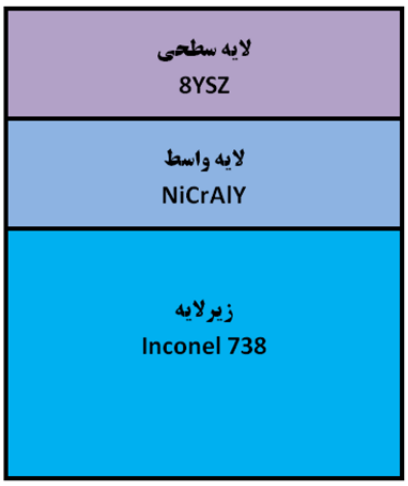
هندسه پوشش موردنظر متشکل از یک ساختار چندلایه است که از زیرلایه، لایه واسط، لایه سرامیکی اولیه و نهایتاً لایه سرامیکی ثانویه تشکیل شده است. جنس لایه‌های نام‌برده به ترتیب اینکونل ۷۳۸، ترکیب MCrAlY، ترکیب سرامیکی زیرکونیای تقویت شده با ایتریا و نهایتاً ترکیب سرامیکی $La_2Zr_2O_7$ می‌باشد که لایه واسط دارای ضخامت ۱۰۰ میکرومتر و سایر لایه‌ها دارای ضخامت ۲۰۰ میکرومتر هستند. نمایش گرافیکی شکل اصلی موتور توربوفن و مجموعه سیستم زیرلایه و پوشش، برش عرضی از مقطع دیواره و نمای سه بعدی مورد استفاده در شبیه‌سازی به ترتیب در شکل‌های (۱و ۲) آمده‌است. تمامی اجزای سیستم اعم از زیرلایه و پوشش‌ها، دوبعدی و شکل‌پذیر و با هندسه پوسته ای درنظر گرفته شده است. ضخامت لایه ها متناسب با نوع پوشش و نیز نوع لایه سطحی متفاوت است و از این رو در شکل (۲) بصورت شماتیک معین شده است. در این تحقیق، ضخامت هر لایه ۲۰۰ میکرون است.



شکل ۱ حوزه محاسبات انتخابی با توجه به هندسه واقعی جسم موردنظر

برای ساده سازی محاسبات و جلوگیری از اعوجاج بیش از حد المانها، فصل مشترک بین تمامی لایه‌های سرامیک/فلز و سرامیک/سرامیک تخت و بدون زبری فرض شده است. همچنین، فرض شده است که هیچگونه مقاومت حرارتی بین لایه‌ها وجود ندارد و از دانسیته تئوری ترکیبات سرامیکی حین تحلیل استفاده شده است (از تخلخل موجود در لایه‌های سرامیکی صرفنظر شده است). در تحلیل حاضر از المانهای مثلثی درجه دوم با شش گره در رئوس و وسط اضلاع استفاده شد. این نوع المان امکان بالاتر بردن صحت انتگرال-گیری برای محاسبات جابجاییهای مربوط به کرنش و تنش پسماند را فراهم می‌سازد. از طرف دیگر برای کاهش زمان حل از روش انتگرالگیری کاهشی از نوع کرنش صفحه ای بهره برده شده است.

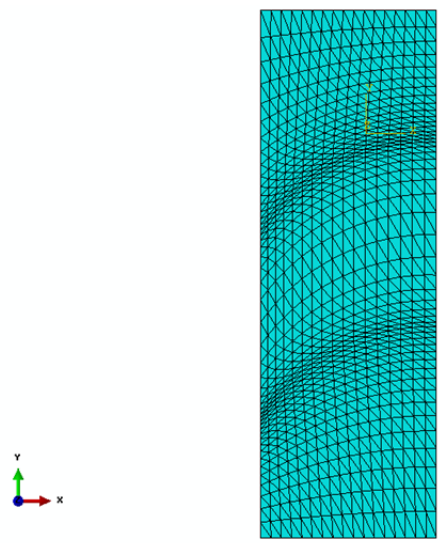
هنگام اختصاص دادن خواص حرارتی و مکانیکی به لایه های مختلف، فرض همسانگردی خواص در هر دو بعد لحاظ شده است زیرا از حضور عیوب ناشی از فرایند پوشش‌دهی صرفنظر شده است. جدول (۱) خواص مورد استفاده در تحلیل کوپل حرارتی و مکانیکی مورد استفاده را بصورت تابعی گسسته از دما نشان می‌دهد، شایان ذکر است که نرم افزار اباکوس داده‌های بیشتر را با برونیابی استخراج و استفاده می‌کند. با توجه به بزرگ و قابل ملاحظه بودن حوزه محاسبات در قیاس با ابعاد عیوب بلوری حاضر در ساختار سرامیک‌ها، فرض همسانگردی لایه‌های پوشش قابل قبول است.



شکل ۲ ترتیب لایه های پوشش سد حرارتی موردنظر در شبیه-سازی

جدول ۱ خواص فیزیکی و مکانیکی اجزای پوشش سد حرارتی

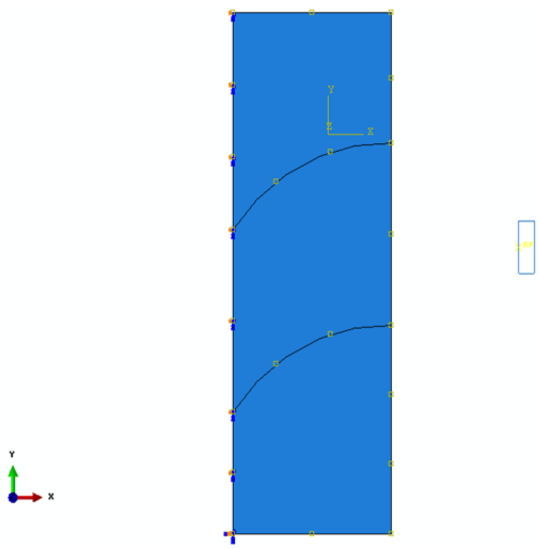
خواص ماده	دما (k)	زیرلایه Inconel 738	لایه واسط NiCoCrAlY	YSZ	$La_2Zr_2O_7$
مدول الاستیک (GPa)	۲۷۶	۲۰۰	۲۲۵	۲۱۰	۱۷۵
	۶۷۳	۱۷۹	۱۸۶	۲۰۵	۱۶۷
	۱۰۷۳	۱۴۹	۱۴۷	۱۸۱	۱۵۰
	۱۴۷۳	۱۴۰	۱۳۴	۱۶۲	۱۳۵
دانسیته (kg/m^3)	۲۷۶	۸۲۲۰	۷۳۲۰	۵۴۰۰	۴۸۱۰
	۶۷۳				
	۱۰۷۳				
	۱۴۷۳				
ضریب پواسون	۲۷۶	۰/۳	۰/۳	۰/۲	۰/۱۲
	۶۷۳				
	۱۰۷۳				
	۱۴۷۳				
ضریب انبساط حرارتی ($\times10^{-6}.k^{-1}$)	۲۷۶	۱۴/۴	۱۱/۶	۹/۱	۴/۵
	۶۷۳	۱۴/۴	۱۴	۱۰/۵۸	۹/۸۵
	۱۰۷۳	۱۵/۶	۱۶	۱۱/۱۳	۸/۲۱
	۱۴۷۳	۱۵/۸	۲۰/۸	۸/۵	/۱۷ ۱۰
گرمای ویژه (J.(kg .k)-1)	۲۷۶	۴۳۱	۵۰۱	۵۰۰	۲۱۹
	۶۷۳	۵۲۴	۵۹۲	۵۷۶	۴۵۵
	۱۰۷۳	۶۲۷	۷۸۱	۶۳۷	۴۷۵
	۱۴۷۳	۷۱۲	۷۶۴	۶۵۰	۵۱۵
هدایت حرارتی (W/m°C)	۲۷۶	۱۱/۵	۴/۳	۱/۰۶	۰/۸۱
	۶۷۳	۱۷/۵	۶/۴	۰/۸	۰/۷۸
	۱۰۷۳	۲۳/۸	۱۰/۲	۰/۶۵	۰/۷۴



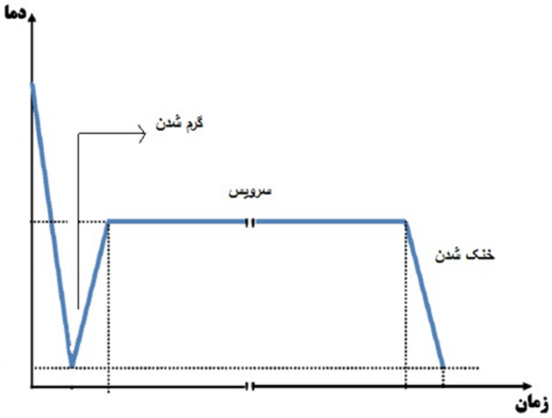
شکل ۳ محیط مش‌بندی‌شده مجموعه زیرلایه، لایه واسط و لایه سرامیکی پوشش سد حرارتی

شکل (۳) حوزه محاسبات را بصورت مش‌بندی شده نمایان می‌سازد. برای انجام تحلیل ساختاری و محاسبه تنش پسماند، اعمال شرایط مرزی مناسب مکانیکی ضروری است. شرایط مرزی مختلفی بر روی نواحی کناری پوشش اعمال می‌گردد و در این تحقیق نیز بر اساس استراتژی غالب، شرایط مرزی مکانیکی متناسب با شرایط واقعی به طرفین قطعه اعمال گردید. با اعمال قیود مناسب می‌توان از حرکت قطعه در جهات مقید شده جلوگیری نمود و نیز تفسیر صحیحی از تنش‌های پسماند درون ماده به دست آورد. از اینرو، گوشه‌های افقی ساختار پوشش در جهت عمودی مقید شده و گوشه‌های عمودی از حرکت در جهت افقی بازداشته شده‌اند (شکل ٤).

سیکل بارگذاری حرارتی بدین صورت است که ابتدا در مرحله گرم شدن مجموعه در مدت زمان ۳۰۰ ثانیه تا دمای مورد نظر سرویس گرم می‌شود و در مرحله سرویس به مدت یک ساعت در آن دما باقی می‌ماند. در آخرین مرحله با صرف زمان ۳۰۰ ثانیه سیستم حرارت خود را از دست خواهد داد. نمودار شماتیک بارگذاری حرارتی در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ٤ اعمال شرایط مرزی مکانیکی به سیستم پوشش سد حرارتی



شکل ۵ بارگذاری حرارتی اعمالی روی سیستم پوشش سد حرارتی

نتایج و بحث

برای دستیابی به یک حل اقتصادی (با دقت مناسب و در کوتاهترین زمان ممکن) معمولاً می‌توان به روش‌های مختلف زمان لازم برای حل مساله را کاهش داد. یک روش کارا و موثر، افزایش مصنوعی ابعاد المان‌ها به گونه‌ای است که حد پایداری افزایش یابد و تحلیل در تعداد گام‌های کمتری صورت پذیرد. این روش، تکنیک مقیاس‌دهی به جرم (mass scaling) نامیده می‌شود. در اکثر مساله ها از روش مقیاس دهی به جرم با مقیاس بالا برای کاهش زمان حل مساله بدون ایجاد خطا در جواب استفاده می‌شود. مقایسه نمودارهای انرژی داخلی و جنبشی معیاری برای ارزیابی عدم ایجاد خطا در مساله با استفاده از این روش است. میزان گام زمانی پایدار در نرم افزار به وسیله تخمین آن بر روی تک تک المان‌ها و سپس انتخاب کوچک ترین گام زمانی تعیین می‌گردد. به همین دلیل در صورتی که در مدل از المان-های بسیار کوچک استفاده شده باشد یا به هر دلیل قسمتی از مدل به دلیل تغییر شکل های پیچیده، طول مشخصه کوچکی را به حل تحمیل کند، مقدار گام زمانی بسیار کوچک می گردد و در نتیجه تعداد گام زمانی مورد نیاز برای کل زمان شبیه سازی و به دنبال آن زمان صرف شده برای شبیه سازی بسیار طولانی می شود. گاهی اوقات این المان های کوچک تعدادشان بسیار اندک بوده و در قسمت کوچکی از کل مدل متمرکز هستند به صورتی که تاثیر چندانی در دقت حل نداشته ولی به شدت باعث کم شدن حد پایداری می‌گردند. در این شرایط لازم است با استفاده از روش‌هایی این گام زمانی پایدار را افزایش داد، به گونه ای که علاوه بر زمان حل، دقت مساله نیز تحت تاثیر قرار نگیرد. با توجه به معادلات (۱) و (۲)، مشخص می‌گردد که افزایش چگالی المان می‌تواند سرعت موج را درآن کاهش دهد.

$$dt = \frac{Le}{C} \quad (۱)$$

$$C = \left(\frac{E}{\rho}\right)^{0.5} \quad (۲)$$

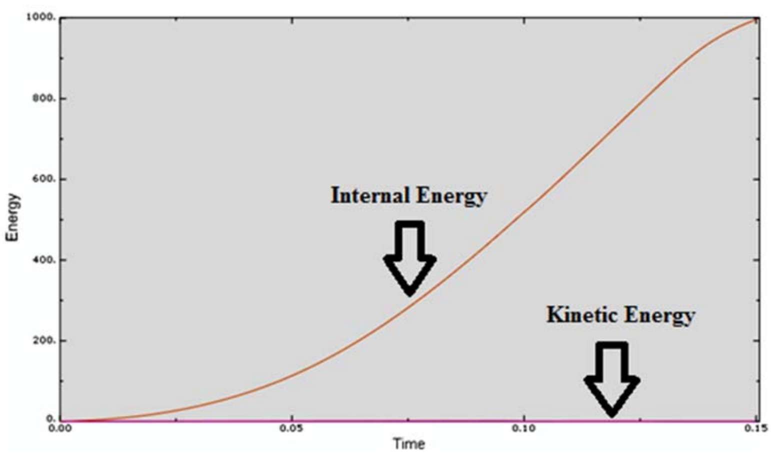
با توجه به فرمولهای بالا، با افزایش میزان چگالی ماده به میزان مورد نظر، سرعت حرکت صوت درون جسم به میزان جذر آن مقدار کاهش می‌یابد و به همان میزان، نمو حلی افزایش می‌یابد. این افزایش نموهای حلی، کل زمان حل را به بازه های زمانی کوچکتری تقسیم می‌کند. حلگر ضمنی نرم‌افزار با استفاده از همین اصل، روشی را برای کاهش زمان شبیه‌سازی ارائه می-دهد که به مقیاس‌دهی به جرم معروف است. در این روش به طور مجازی، جرم کل مدل یا قسمتی از آن افزایش یافته و به این ترتیب گام زمانی پایدار افزایش می یابد. در صورتی که مقیاس دهی به جرم به درستی انجام شود می‌تواند علاوه بر این که زمان حل را کاهش دهد، دقت حل را نیز در حد قابل قبولی حفظ کند. در صورتی که شبیه‌سازی شبه استاتیک باشد، کار انجام شده توسط نیروهای خارجی تقریباً برابر با انرژی داخلی سیستم خواهد بود. در این حالت انرژی ویسکوز تلف شده معمولاً کوچک است، مگراینکه از مواد ویسکو الاستیک استفاده شده باشد. همانطور که از ماهیت فرآیند های شبه استاتیک انتظار می رود، به دلیل سرعت بسیار کم ماده درون مدل، نیروهای اینرسی بسیار کوچک و قابل صرف نظر کردن هستند . به همین دلیل انرژی جنبشی ماده قابل تغییر فرم نیز بسیار کوچک خواهد بود . لذا طبق یک قانون عمومی، انرژی جنبشی ماده تغییر شکل پذیر نباید از بخش کوچکی (معمولاً ۵ تا۱۰ درصد) از از انرژی داخلی آن، در حین فرآیند تجاوز کند.

حین حل عددی از قانون کلی ذکر شده برای بررسی صحت شبیه‌سازی شبه استاتیک استفاده می‌شود. در ابتدای تحلیل از یک مقیاس بندی جرم نسبتاً بزرگ استفاده شده و شبیه‌سازی انجام می‌شود. پس از دستیابی

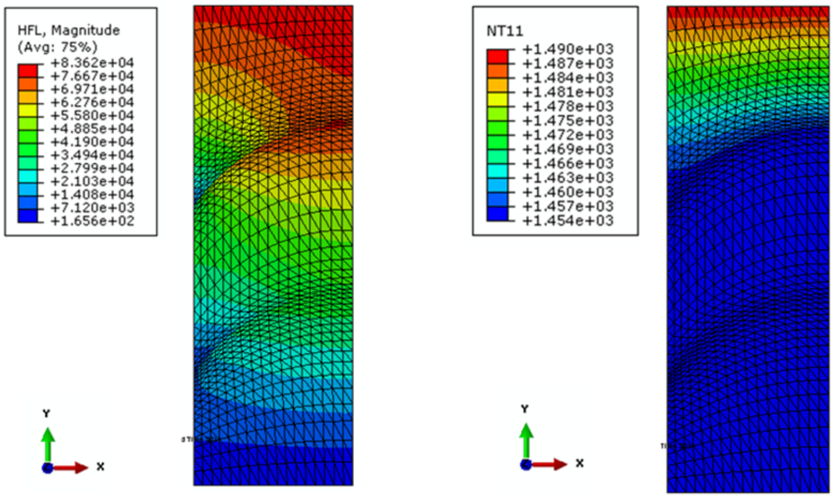
به نتایج بایستی نسبت انرژی جنبشی به انـرژی داخلـی ماده رسم و بررسی شود . در صورتی که نسبت ایـن دو انرژی از مقدار گفته شده تجاوز نکرده باشـد، مـی‌تـوان اطمینان حاصل نمود که نتایج مربوط به یک فرآیندشـبه استاتیک است. در غیر این صورت مقدار مقیاس دهی به جرم کاهش داده می شود و دوباره مساله حل می گردد و این فرآیند تا جایی ادامه می یابد کـه نسـبت مـذکور در بیشتر زمان فرایند به حد مورد نظر برسد و در عین حال اختلاف پاسخ‌ها بین دو شبیه‌سازی متوالی ناچیز گـردد. افزایش انرژی جنبشی به مقداری بیش از مقدار ذکر شده بیانگر این است که مقداری از انرژی صرف شـده بـرای غلبه به اینرسی ماده و در نتیجـه شـتاب دادن بـه جسـم صرف شده است. شکل (٦) نمودارهای تغییرات انـرژی جنبشی و داخلـی را در محـدوده معینـی از فرآینـد کـه تغییرات دما به حد پایا می‌رسد، نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده اسـت، انـرژی جنبشـی کسر بسیار اندکی از کل انرژی درون سیسـتم را صـرف می‌کند و حالت شبه اسـتاتیک سیسـتم قابـل دسترسـی است. روند تغییرات در ۳۰ ثانیه حرارتدهی رسـم شـده است و این روند در بقیه فرایند ادامـه دارد کـه در ایـن شگل برای نشان دادن بهتر مقایسه، فقـط همـان مرحلـه اول نشان داده شده است.

اعوجاج مش‌ها در مدل کوپلـه المـان محـدود تـا جایی ادامه می‌یابدکه مش از به دست آوردن نتایج دقیق عاجز است و در نتیجه تحلیل به دلایل زیادی خاتمه می-یابد .در چنین مسائلی ضروری است کـه از ابـزار مـش بنـدی هوشـمند و تغییریافتـه‌ای بـرای کـاهش مـوثر تغییرشکل و اعوجاج مش‌هـا و مشـکلات ناشـی از آن استفاده گردد. مش‌بندی تطبیق‌پذیر ابزاری است که بـاقی ماندن مش با کیفیت را حتی با وجود تغییر فرم‌های شدید در طول تحلیل امکان پـذیر مـی‌سـازد. نـرم‌افـزار المـان محدود قابلیت‌های بسیار زیاد و قوی مش‌بنـدی تطبیـق پذیر را برای تحلیل مسائل به شدت غیرخطی، در دامنـه مسائل شبه استاتیکی تـا مسـائل دینامیـک فـراهم کـرده است. در این تحقیق از تنظیم دو رابطه فرکانس و میزان تغییر گره‌ها در هر نمو حلی برای حداقل نمودن میـزان اعوجاج مش‌بندی و همچنین حداقل نمودن زمـان حـل مدل استفاده شد.

فرکانس بیانگر این مساله هست که بعد از چندین نمو حلی گره‌ها به مکان اصلی بازگردادنیده شـوند.این امر با امکان دادن به مش برای حرکـت نسـبتاً مسـتقل از حرکت ماده انجام می پذیرد که باعث می‌گردد مـش بـا هندسه جدید قطعه کار تطبیق یابد، با ایـن وجـود مـش-بندی تطبیق‌پذیر تعداد المان‌ها و اتصال بین آن‌ها را تغییر نمی‌دهد.

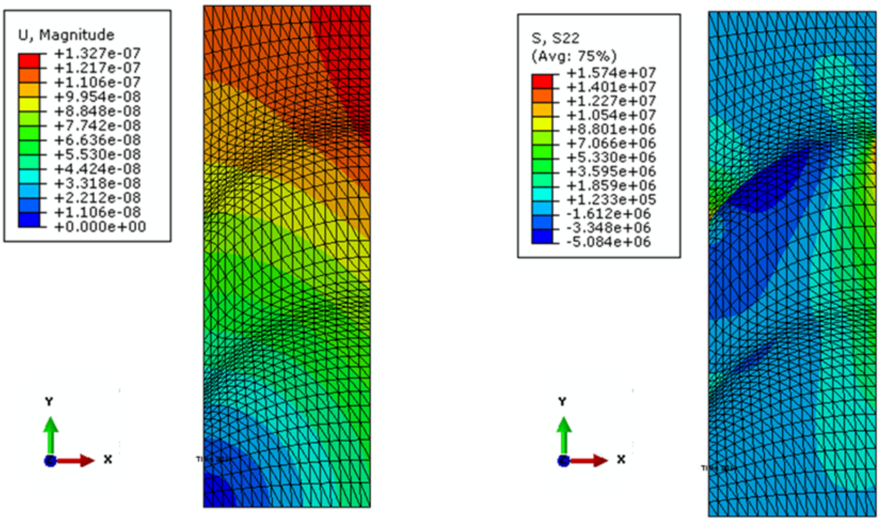


شکل ٦ مقایسه تغییرات انرژی جنبشی و داخلی حین فرایند



(ب) (الف)

شکل ۷ کانتورهای الف) توزیع دمایی؛ ب) شار حرارتی در سیستم پوشش سد حرارتی



(ب) (الف)

شکل ۸ کانتورهای الف) توزیع تنش پسماند؛ و ب) اعوجاج لایه‌ای در سیستم پوشش سد حرارتی

بعد از چندین بار تکرار حل مساله، کمترین میزان تغییرات هندسه مش و بیشترین میزان کاهش زمان حل به ازای فرکانس ۱ و ۹ (تعداد دفعات جابجایی گره در هر فرکانس) بدست آمد. به بیان دیگر، با رعایت معیارهای همگرایی، در محدوده‌ای از حل از تحلیل لاگرانژی استفاده شده و هندسه ماده به مش‌بندی مقید است و در ادامه حل، دیگر ماده و مش‌بندی مستقل از یکدیگر خواهند شد. از جایی به بعد با ادامه حل، فضای اویلری حین پیشرفت مساله حکفرما است و احتمال صفرشدن جرم المان را از بین می‌برد.

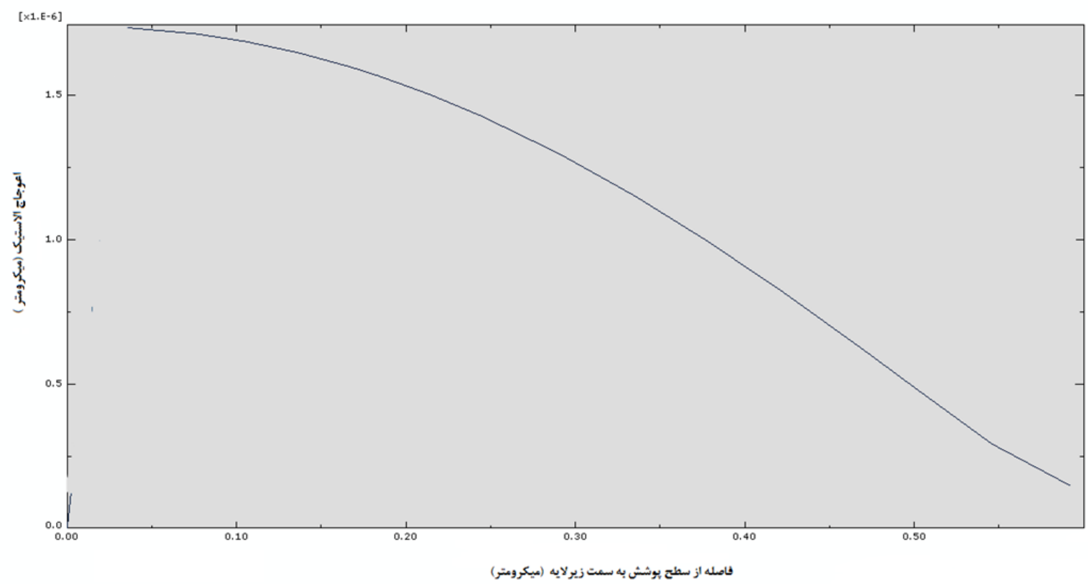
شکل (۷) توزیع حرارت و شار حرارتی جاری درون لایه‌ها و شکل (۸) توزیع تنش پسماند و میزان اعوجاج الاستیک درون مجموعه سیستم پوشش سد حرارتی را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل‌های (۷–الف) و (۷–ب) دیده می‌شود بیشترین میزان تمرکز حرارتی در دو لایه پوشش‌های سد حرارتی فوقانی دیده می‌شود که با فلسفه طراحی و زمینه کاربرد این دسته از سیستم‌های

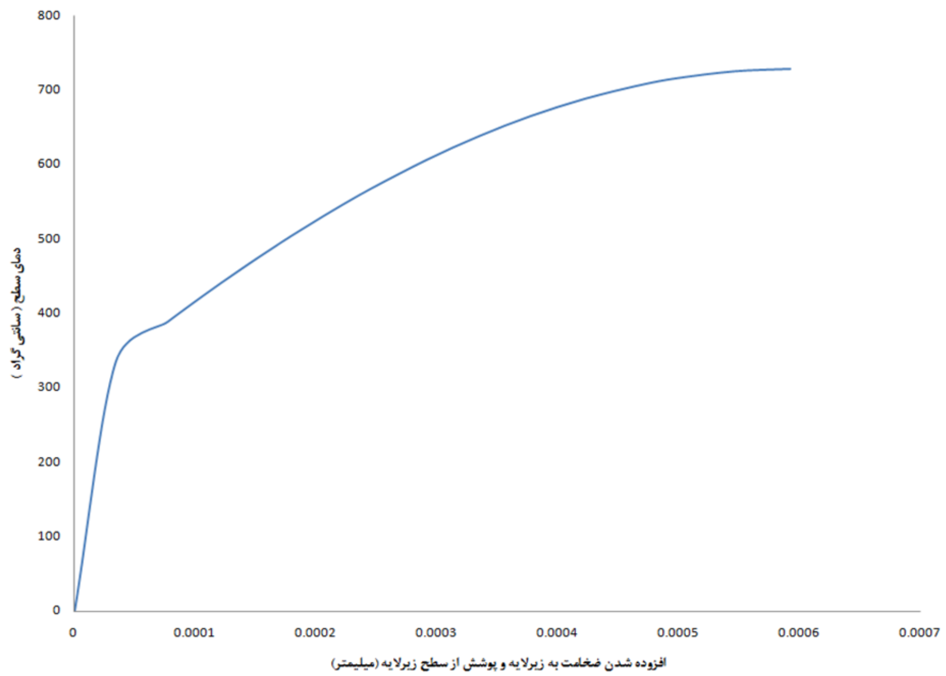
محافظ در توافق است. پوششهای سرامیکی دو لایه با دمای ذوب بسیار بالا بعنوان سد حرارتی عمل می‌کنند و بیشترین میزان انرژی حرارتی را درون خود حفظ می‌کنند تا به لایه‌های زیرین که از جنس فلزی هستند و دماهای نرم شدن، خمیری شدن و پارگی داغ کمتری دارند، آسیب کمتری وارد گردد [۲۶]. بعلاوه همانطور که در شکل (۷- ب) دیده می‌شود زیرلایه از جنس سوپرآلیاژ نیز متحمل کمترین میزان بار حرارتی می‌گردد و حداکثر عمر را برای توربوفن به همراه خواهد داشت.

در شکل (۸) کارکرد مثبت دیگر این گونه طراحی پوشش‌های ترکیبی سد حرارتی دیده می‌شود. حداکثر مقادیر تنش پسماند در درون محدوده دو پوشش سرامیکی بالایی قرار گرفته است و تقریباً تنش‌های مخرب کاهنده عمر که ناشی از تغییرات دمایی در سیستم هستند، از لایه واسط عبور نمی‌کنند و این امر عمر زیرلایه را افزایش می‌دهد. با مقایسه تحلیل‌های مشابه که روی پوشش‌های سد حرارتی ساده تک لایه انجام شده است [۲۶] می‌توان به این نتیجه رسید که میزان تنش ذخیره شده در زیرلایه با سیستم‌های تک لایه بیشتر از سیتم‌های نوین ارائه شده در این تحقیق است. باید به مزایای فوق این مزیت را نیز اضافه نمود که تمرکز شارحرارتی در لایه‌های بالایی باعث حصول زودهنگام تعادل حرارتی در نیمه بالایی سیستم پوشش شده و کاهش حجم حرارت انتقالی به ترکیبات فلزی زیرین را به همراه خواهد داشت.

شکل (۹) میزان اعوجاج در راستای شعاعی را برای مجموعه سیستم زیرلایه و سه پوشش بالایی متشکل از یک لایه واسط و دو لایه سرامیکی سد حرارتی نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل دیده می‌شود، تمامی افت دمایی و انرژی حرارتی بصورت قابل ملاحظه‌ای در دو لایه سرامیکی بالایی متمرکز شده است و حتی در لایه اتصال هم چندان بار حرارتی و تخریب ناشی از آن را مشاهده نمی‌کنیم. مقایسه این نتایج با نتایج حاصل از شبیه‌سازی پوششهای سد حرارتی معمولی، افت دمایی بیشتر و دمای زیرلایه پایین‌تر را برای این پوششهای نوین نمایان می‌سازد [۱۴،۱۵].



شکل ۹ الگوی توزیع اعوجاج در طول سیستم پوشش و لایه‌های پوشش سد حرارتی



شکل ۱۰ روند افزایش دمای سطح سیستم از زیرلایه به سمت پوشش‌ها

شکل (۱۰) روند افزایشی تغییرات دمایی را از زیرلایه تا پوشش زیرکوناتی بالایی نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل به وضوح مشاهده می‌شود در زیرلایه از جنس سوپرآلیاژ شاهد حداقل دماهای کاری در سیستم هستیم که این خود به افزایش عمر توربوفن کمک می‌کند. در ادامه با واردشدن به ناحیه لایه واسط و لایه‌های دوتایی سرامیکی بعدی، دو اتفاق مثبت در راستای ازدیاد بیشتر عمر زیرلایه فلزی می‌افتد. نخست اینکه، در لایه‌های فوقانی پوشش شاهد دماهای بالاتر هستیم و میزان افت دمایی از سطح پوشش سد حرارتی تا زیرلایه قابل ملاحظه می‌باشد. این امر به نوبه خود کارکرد مثبت حضور سیستم‌های سد حرارتی را در کاهش دمای زیرلایه نشان می‌دهد. مزیت دوم تمرکز بیشترین میزان بار حرارتی در محدوده ضخامت دو لایه فوقانی سرامیکی در پوشش دو لایه سرامیکی می باشد که این امر در مقایسه با پوشش سد حرارتی تک لایه سرامیکی نشان دهنده قابلیت عایق‌سازی قابل توجه پوشش دولایه ترکیبی پیشنهاد شده در پژوهش حاضر می‌باشد [۱۵،۱۶]. به عبارت دیگر، این سیستم جدید لایه نشانی، علاوه بر نشان دادن مقاومت به زینتر بالاتر و از دست نرفتن خواص عایق حرارتی در دمای بالا، به دلیل دولایه بودن و چسبندگی مناسب، می‌تواند مقاومت بیشتری در برابر بار حرارتی از خود نشان دهد [۲۶].

نتیجه گیری

در این تحقیق شبیه‌سازی عددی توزیع دما و تنش‌های پسماند در پوشش سد حرارتی سه لایه ($La_2Zr_2O_7$/8YSZ/NiCrAlY) تحت یک چرخه حرارتی ترکیبی و واقعی، شامل گرمایش از دمای محیط تا دمای سرویس، نگهداری در دمای سرویس و سپس سرمایش تا دمای محیط مورد بررسی قرار گرفت. کانتورهای دمایی و شار حرارتی نشان داد که پوششهای نوین ترکیبی نسبت به پوششهای رایج سد حرارتی گرمای کمتری را به زیرلایه انتقال می‌دهند و از انتقال انرژی حرارتی نیز جلوگیری می‌کنند. توزیع تنش پسماند در طول منطقه پوشش–زیرلایه بصورت عمده در ناحیه پوششهای سرامیکی متمرکز شده است و بیشترین میزان اعوجاج نیز در همین ناحیه قرار دارد. این مطالب گویای این است که پوشش‌های دو لایه سد حرارتی دارای بیشترین میزان کاربرد در افزایش عمر

قطعات توربین ها هستند. بعلاوه از تکنیک افزایش مجازی جرم و دانسیته المان برای افزایش نمو حل و بدنبال آن، کاهش کل زمان محاسبات با موفقیت بهره برده شد. علاوه بر آن، استفاده از سیستم هوشمند و تطبیق‌پذیر انتقال مش از حالت لاگرانژی به اویلری از اعوجاج بیش از حد و صفرشدن جرم المان جلوگیری کرد و در نتیجه همگرایی مساله حین حل کوپل با اطمینان بیشتری حاصل شد.

مراجع

1. Vaßen R., Ophelia Jarligo M., Steinke T., Emil Mack D., Stöver D., “Overview on advanced thermal barrier coatings”, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 205, pp. 938-942, (2010).
2. Tamarin Y., “Protective Coatings for Turbine Blades”, ASM International, Materials Park, Ohio, (2002).
3. Keyvani A., Saremi M., Heydarzadeh Sohi M.,”Oxidation resistance of YSZ-alumina composites compared to normal YSZ TBC coatings at 1100 ºC”, *Journal of alloys and compounds*, Vol. 509, pp. 8370-8377, (2011).

٤. عرب سرهنگی س.، میرحبیبی ع.، عربی ح.، رستگاری س.، "بررسی خواص ریزساختاری و مکانیکی پوشش چند لایه سپرحرارتی کامپوزیتی زیرکونیا/آلومینا و پوشش دولایه زیرکونیایی اعمال شده به روش پاشش پلاسما"، *فصلنامه سرامیک ایران*، شماره ۳۱، (۱۳۹۱).

5. Mohammadi M., Javadpour S., Kobayashi A., Jenabali Jahromi S.A., Shirvani K., "Thermal shock properties and microstructure investigation of LVPS and HVOF-CoNiCrAlYSi coatings on the IN738LC superalloy", *Vacuum*, Vol. 88, pp.124-129 (2013).
6. Cao X.Q., Vassen R., Stoever D., “Ceramic materials for thermal barrier coatings”, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 24, pp. 1–10 (2004).
7. Lima C.R.C., Cinca N., Guilemany J.M., "Study of the high temperature oxidation performance of Thermal Barrier Coatings with HVOF sprayed bond coat and incorporating a PVD ceramic interlayer", *Ceramics International*, Vol. 38, pp. 6423-6429, (2012).
8. Khor K.A., Gu Y.W., "Thermal properties of plasma-sprayed functionally graded thermal barrier coatings", *Thin Solid Films*, Vol. 372, pp.104-113, (2000).
9. Di-Girolamo G., Blasi C., Brentari A., Schioppa M., "Microstructure and thermal properties of plasma-sprayed ceramic thermal barrier coatings", *Studi & ricerche*, Research papers, (2013).

۱۰. رحیمی پور م.، مهدی پور م.، "لایه نشانی پلاسمایی MCrAlY/YSZ بر روی سوپر آلیاژ Inconel 738 و بررسی رفتار خوردگی داغ آن"، نشریه علمی پژوهشی علوم و مهندسی سطح، شماره ١٤، صفحات ٧٥-٦٧، (١٣٩١).

11. Wang L., Wang Y., Sun X.G., He J.Q., Pan Z.Y., Wang C.H., “A novel structure design towards extremely low thermal conductivity for thermal barrier coatings – Experimental and mathematical study”, *Materials and design*, Vol. 35, pp. 505-517, (2012).

۱۲. جمالی ح.، مظفری نیا ر.، شجاع رضوی ر.، احمدی پیدانی ر.، "ارزیابی ظرفیت عایق سازی حرارتی پوشش های سد حرارتی پایه زیرکنیایی پاشش پلاسمایی شده"، *مجله علمی پژوهشی مهندسی سطح*، شماره١٤، صفحات ٨٧-٧٧ ، (١٣٩١).

۱۳. زرگر ح.، سرپولکی ح.، رضایی ح.، "آشنایی با پوشش های سرامیکی محافظ حرارت و روشهای اعمال"، فصلنامه سرامیک

ایران، شماره ٦-٥، صفحات ٥٩-٤٥، (١٣٨٥).

14. Naga S.M., “Ceramic matrix composite thermal barrier coatings for turbine parts”, In book: Advances in Ceramic Matrix Composites, Woodhead Publishing Limited, Edition 1, Chapter 21, pp. 524-533, (2014).
15. Xu Z., He L., Mu R., He Sh., Huang G., Cao X., “Hot corrosion behavior of $L_{a2}Z_{r2O7}$ with the addition of Y2O3 thermal barrier coatings in contacts with vanadate-sulfate salts”, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 504, pp. 382-385, (2010).
16. Wang L., Wang Y., Zhang W.Q., Sun X.G., He J.Q., Pan Z.Y., Wang C.H., “Finite element simulation of stress distribution and development in 8YSZ and double-ceramic-layer $La_2Zr_2O_7$/8YSZ thermal barrier coatings during thermal shock”, *Applied Surface Science*, Vol. 258, pp. 3540- 3551, (2012).
17. Zhang S., Zhao D., “Aerospace Materials Handbook”, CRC Press, 1st edition, (2012).
18. Smarsly W., "Coatings for Advanced Aero Engine Materials", *presented at the 8th HIPIMS Conference*, University Sheffield, UK, (2009).
19. Baker M., "Finite element simulation of interface cracks in thermal barrier coatings", *Computational Materials Science*, Vol. 64, pp. 79-83, (2012).
20. Saeedi B., Sabour A., Ebadi A., Khoddami A.M., “Influence of the Thermal Barrier Coatings Design on the Oxidation Behavior”, *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 25-4, pp. 499-507, (2009).
21. Khoddami A.M., Sabour A., Hadavi S.M.M., “Microstructure formation in thermally-sprayed duplex and functionally graded NiCrAlY/Yttria-Stabilized Zirconia coatings”, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, pp.6019–6024, (2007).
22. Akbarpour S., Motamedian H.R., Abedian A., “Micromechanical FEM modeling of thermal stresses in functionally graded materials”, *26th International congress of the Aeronautical Sciences*, Anchorage, Alaska, USA, (2008).
23. Tang F., Ajdelsztajn L., Kim G.E., Provenzano V., Schoenung J.M., “Effects of variations in coating materials and process conditions on the thermal cycle properties of NiCrAlY/YSZ thermal barrier coatings”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 425, pp. 94–106, (2006).
24. Watremetz B., Baietto-Dubourg M.C., Lubrecht A.A., “2D thermo-mechanical contact simulations in a functionally graded material: A multigrid-based approach”, *Tribology International*, Vol. 40, pp. 754–762, (2007).
25. Zhang X.C., Xu B.S., Wang H.D., Wu Y.X., “Modeling of the residual stresses in plasma-spraying functionally graded ZrO_2/NiCoCrAlY coatings using finite element method”, *Materials and Design*, Vol. 27, pp. 308-315, (2006).
26. Ranjbar-far M., Absi J., Mariaux G., Smith D.S., “Crack propagation modeling on the interfaces of thermal barrier coating system with different thickness of the oxide layer and different interface morphologies, *Materials and Design*,Vol. 32, pp. 4961-4969, (2011).